第 40 卷 第 4 期
2023 年 8 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 4
Aug. 2023

文章编号:1000-4939(2023)04-0926-08

风雪共同作用下大跨度双曲屋盖数值模拟研究

孙芳锦[1,2],孙红玉[1],于珊珊[1],张大明[3]

(1. 辽宁工程技术大学土木工程学院,123000 阜新;2. 桂林理工大学土木建筑与工程学院,541004 桂林;3. 桂林理工大学信息科学与工程学院,541006 桂林)

摘　要:“风致雪漂”运动可能会造成建筑物倒塌,威胁到人身财产安全,因此风雪的共同作用在设计大跨度结构时是不能忽略的。本研究采用欧拉-欧拉方法,基于 k-kl-ω 湍流模型,选择的大跨度双曲屋盖结构的投影形状有 4 种,分别为矩形、正方形、椭圆形以及圆形,研究在风雪流共同作用下风向角不同时这 4 种结构屋盖表面的风致积雪压力系数曲线图和积雪分布系数云图,并进行了对比分析,得到积雪分布规律。结果表明:风致雪漂作用下 4 种形状屋盖结构表面风致积雪压力系数比单独风作用下的平均压力系数大;4 种屋盖结构表面的风致积雪压力系数最大值出现的位置不同;风向角对屋盖表面的风致积雪压力有很大影响,当风向角不同时,屋盖表面压力从大到小的排列顺序依次为矩形、椭圆形、正方形和圆形屋盖。

关键词:风吹雪;大跨度屋盖结构;欧拉-欧拉方法;数值模拟;风荷载;压力系数

中图分类号:TU399　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2023.04.023

Numerical simulation of large-span hyperbolic roofs under the combined action of wind and snow

SUN Fangjin[1,2], SUN Hongyu[1], YU Shanshan[1], ZHANG Daming[3]

(1. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, 123000 Fuxin, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, 541004 Guilin, China;
3. College of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology 541006, Guilin, China)

Abstract: “Wind-induced snow drift” may cause the collapse of buildings, thus affecting people’s property and personal safety. Therefore, the combined effect of wind and snow can not be ignored in the design of long-span structures. This paper is based on the mixture multiphase flow model and k-kl-ω model, using Euler-Euler method. Four kinds of large span hyperbolic roof structures with projection shapes of square, rectangular, circular and elliptical are selected as the model structures. When the wind direction angle is different, the curve of wind-induced snow pressure coefficient and snow distribution coefficient cloud map on the roof surface of the four structures under the combined action of wind and snow are studied. In addi-

收稿日期:2021-09-13　　**修回日期:**2021-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 52178468,52268023);广西自然科学基金资助项目(No. 2023GXNSFAA026418);广西青年创新人才科研专项资助项目(No. 2019AC20022);广西建筑新能源与节能重点实验室资助项目(No. Gui Keneng 19-J-21-14);广西岩土力学与工程重点实验室资助项目(桂科能 19-Y-21-2);桂林理工大学科研启动基金(No. GUTQGJJ2019041, GUTQDJJ2019042)

通信作者:孙芳锦,教授。E-mail:e_dm@163.com

引用格式:孙芳锦,孙红玉,于珊珊,等. 风雪共同作用下大跨度双曲屋盖数值模拟研究[J]. 应用力学学报,2023,40(4):926-933.
SUN Fangjin, SUN Hongyu, YU Shanshan, et al. Numerical simulation of large-span hyperbolic roofs under the combined action of wind and snow[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(4):926-933.

tion, they are compared and analyzed. The results show that the wind-induced snow pressure coefficient of four roof structures under wind-induced snow drift is larger than that under single wind. The position of the maximum wind-induced snow pressure coefficient on the surface of the four roof structures is different. When the wind direction angle is different, the order of pressure on the roof surface from large to small is rectangular, elliptical, square and circular roof.

Key words: wind blown snow; large-span roof structure; Euler-Euler method; numerical simulation; wind load; pressure coefficient

在强降雪时可能会有大风出现,气流在近地面运行时,会挟带起分散的雪粒形成多相流,这种现象被称为风吹雪。风吹雪会造成雪颗粒的不规则堆积,对建筑物产生不均匀压力,从而造成坍塌事故。大跨度结构刚度比较小,跨度大,受破坏的几率更大。当今社会各种复杂多样的结构形式层见迭出,但以往我国荷载规范是主要参考以前的设计经验和实验内容,对一些简单屋面的雪荷载不均匀分布做出了简略规定。这并不能满足本研究中所涉及的复杂大跨度双曲屋盖结构[1]。国外学者大多对建筑周围的积雪深度等进行研究,国内学者大多研究一些简单屋面的积雪分布。因此本研究利用数值模拟分析,研究风雪共同作用下复杂形状大跨度双曲屋盖表面风致积雪压力分布规律,为未来抗雪灾研究提供一些参考价值。

建筑结构的抗风雪研究方法包括数值模拟、风洞试验和实地观测[2],其中数值模拟成本低,周期短,操作简单安全,受环境影响小。在国外,BEYERS 等[3]数值模拟了一个立方体周围的雪漂,分析积雪侵蚀和沉积,并对比了南极洲的实测结果发现结果吻合。TOMINAGA 等[4]利用新提出的关于雪漂模型的新方法对风致积雪作用下的一个立方体进行了数值模拟分析。BOUTANIOS 等[5]提出一种新型的双向耦合欧拉-欧拉方法,并对比了风洞试验,验证了此方法在数值模拟的可靠性。ZHOU 等[6]提出了一种准稳态方法来模拟屋顶上雪的再分布。

在国内,邹琼等[7]基于计算流体力学,研究对象为浙江温州某大学多层试验教学楼,探究了在不同风向角下屋顶风场的分布规律与不同高度下风场的差异。王辉等[8]基于 CFD 数值模拟,研究了某体育场阶梯型悬挑屋盖在不同风向角下风压分布特性,引入了干扰因子 IF,得出周围建筑物对此屋盖表面风压的扰动影响。孙芳锦等[9]对大跨度膜屋面的风致雪压进行了数值模拟,总结了膜结构表面风致雪压的分布规律。李跃等[10]选用单方程雪相模型,基于风雪单向耦合方法,数值分析了积雪作用下大跨度球壳屋盖结构。赵雷等[11]结合场地实测与风洞试验,对风吹雪作用下阶梯型屋面的积雪规律进行了二维数值模拟,论证了数值模拟的正确性。颜卫亨等[12]选取 Mixture 模型,将屋面进行分区,得到了可用于抗雪设计的屋面积雪分布系数和屋面各分区沉积侵蚀的基本规律。姜昕彤等[13]基于 Euler-Euler 的方法,分析了不同风向角、吹雪时间和积雪厚度对开洞口煤仓表面积雪侵蚀量和沉积量的影响。

1　数值模拟方案

1.1　选用的计算模型与湍流模型

本研究采用欧拉-欧拉方法,以 Mixture 多相流方法和 k-kl-ω 湍流模型为基础进行研究。模拟过程中使用残差收敛,收敛标准选择均方根残差等于 10^{-5},当均方根残差降至不超过 10^{-5}时系统自动停止计算。来自加拿大的 Fabio Rizzo 和 Piero D'Asdia 等人做过风洞试验,是关于大跨度双曲屋盖结构的。本研究所选用的 4 种计算模型就是依照他们试验的缩尺模型建立的。表 1 为模型的具体尺寸,图 1 为几何模型。

表 1　4 种模型的具体尺寸

Tab. 1　Specifi dimensions of four models

模型	L_1/cm	L_2/cm	H_b/cm	ρ	δ	f_1/cm	f_1/cm	H/cm	H_{max}/cm	L_{max}/cm
M1(正方形双曲屋盖)	80.00	80.00	13.33	1/10	1/6	2.67	5.33	8.00	21.33	80
M2(矩形双曲屋盖)	40.00	80.00	13.33	1/10	1/6	2.67	5.33	8.00	21.33	80
M3(圆形双曲屋盖)	80.00	80.00	13.33	1/10	1/6	2.67	5.33	8.00	21.33	80
M4(椭圆形双曲屋盖)	80.00	80.00	13.33	1/10	1/6	2.67	5.33	8.00	21.33	80

注:其中 $\delta = H_b/L_{max}$, $\rho = H/L_{max}$。

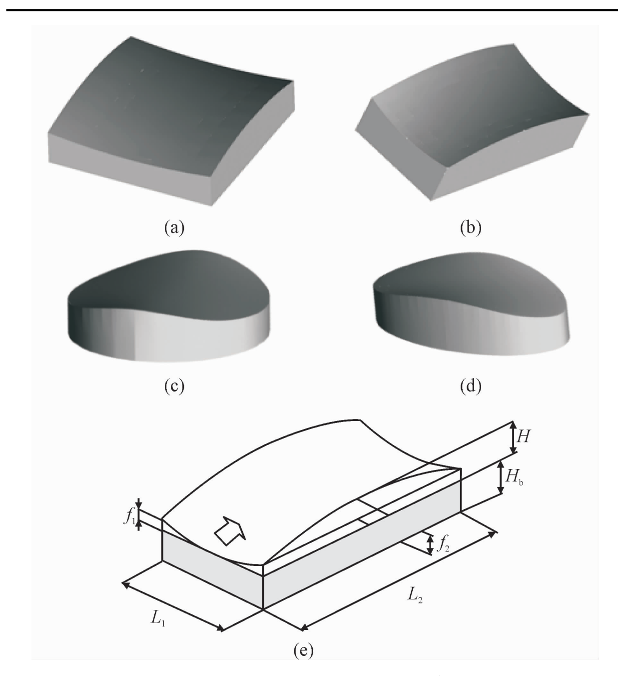


图1　4种几何模型及一些参数

Fig. 1　Four geometric models and some parameters

1.2　方向及其风向角的规定

本研究规定1方向为连接2个点(屋盖表面两个凸线的中点)形成的线,2方向为连接两个点(屋盖表面两个凹线的中点)形成的线。设定迎风面为结构的凹面。规定0°风向角从迎风面1方向(y轴正方向)吹入,在0°风向角基础上旋转45°、90°风向角。测量方向及风向角的示意如图2所示。

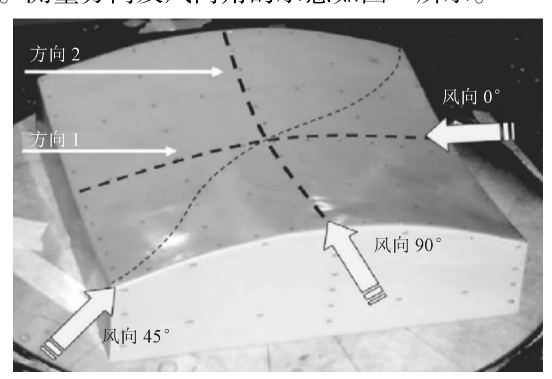


图2　测量方向与风向图

Fig. 2　Direction of sections plotted and wind directions

1.3　确定计算域尺寸

L_1、L_2和L_{max}分别为模型的宽度、长度和最大高度。选取计算域:长(L) = $20L_2$,宽(B) = $10L_1$,高(H) = $10L_{max}$,建筑迎风面到计算域入风口的距离为$7L_2$,$12L_2$为计算域出口到建筑背风面的距离,此时计算域阻塞率满足了<3%的要求[14]。

1.4　划分网格

本研究中非规则四面体结构化网格被采用到建筑物核心区域,六面体结构化网格被采用在核心区域外,建筑物区域内对其网格加密,0.05 m为最小网格尺寸,流场网格总数量在150万左右。模型的网格划分情况见图3。

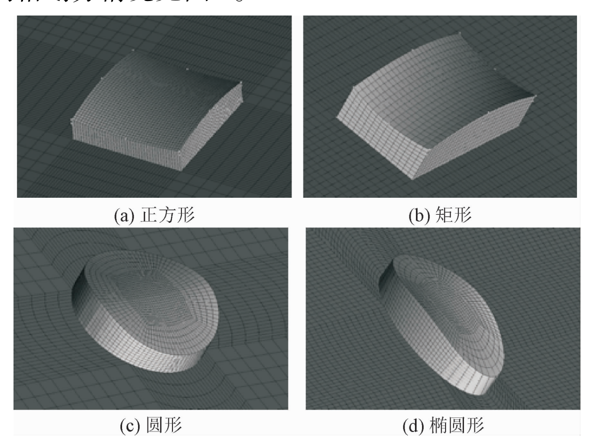


图3　4种模型的网格划分

Fig. 3　Meshing of the four models

1.5　边界条件的设定

入口处采用速度入流的边界条件,风速计算方式为

$$\frac{\bar{u}(z)}{\bar{u}_b}\left(\frac{z}{z_b}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

其中:标准参考高度z_b = 10 m;z表示任一距地高度;$\bar{u}(z)$表示距地高度z处的平均风速;α为地面粗糙度,取0.15;z_b处对应风速$\bar{u}_b$ = 16.7 m/s。

出口处边界条件采用压力出口。自由滑移的壁面条件被用于在流体区域的两侧和顶部,无滑移的壁面条件被采用到地面和建筑物的表面。

1.6　数据处理

风致积雪压力系数用C_p表示为

$$C_p = \frac{P_i - P_0}{1/2\rho v_m^2} \tag{2}$$

其中:P_0(Pa)为参考处的静压;P_i(Pa)为建筑第i点的静压;v_m(m/s)为平均速度(自由流);ρ(kg/m^3)为空气密度。

2　数值模拟正确性验证

本研究屋盖测点分布如图4所示,选取的工况

为 16.7 m/s 风速、3 种风向角(0°、45°、90°)、结构模型为圆形大跨度双曲屋盖，如图 5 所示。将加拿大 Piero D'Asdia 和 Fabio Rizzo 等人所做的风洞试验数据与本次数值模拟数据对比分析(见图 5)，可见两者的数据吻合较好，因此论证了数值模拟的可行性与正确性。

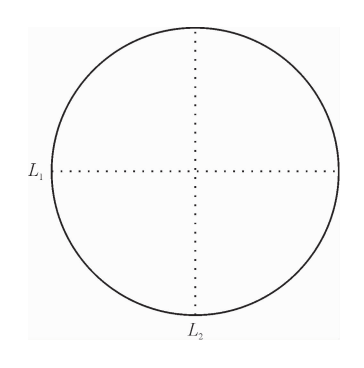
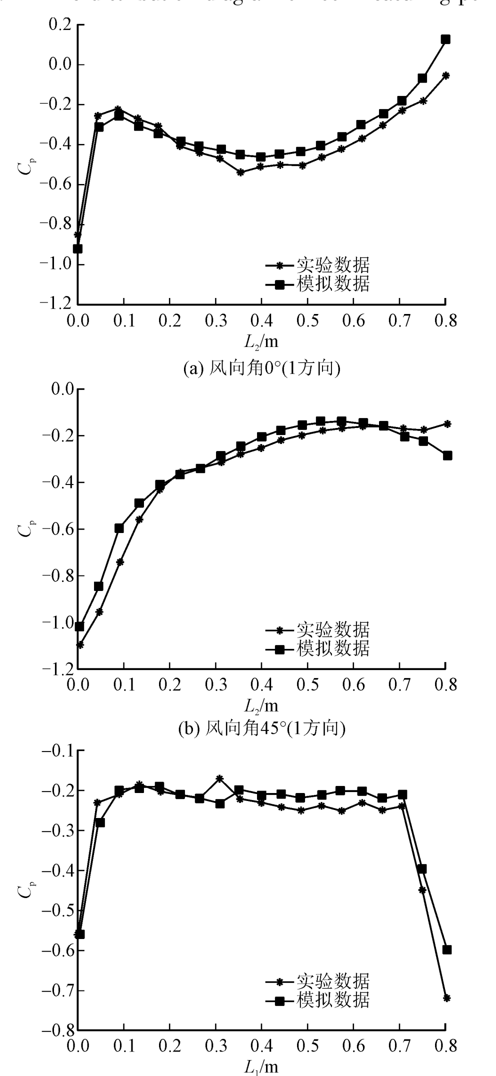


图 4　屋盖测点分布图

Fig. 4　The distribution diagram of roof measuring point



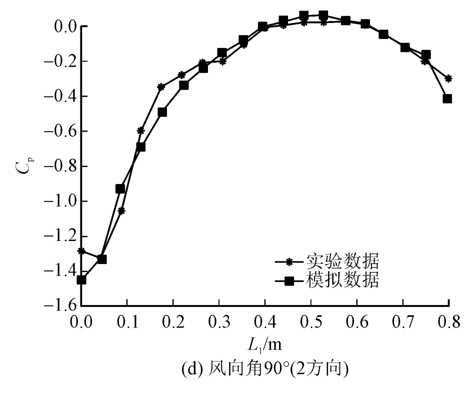


图 5　试验与模拟的对比图

Fig. 5　Comparison of test and simulation

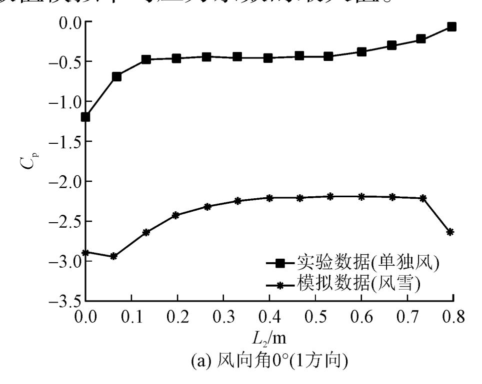
3　数值模拟研究

3.1　大跨度双曲屋盖风致积雪压力研究

本次数值模拟选取风速为 16.7 m/s，雪浓度为 4.54 kg/m^3，风向角为 0°、45°和 90°。此外做了在单独风作用下的风洞试验，得出屋盖结构表面的中轴线测点上的压力系数，并与本次模拟数据进行对比。

3.1.1　正方形大跨度双曲屋盖压力系数分析

由图 6 可知，在 0°风向角 1 方向上试验数据为上升趋势，模拟数据先增后减；4.4 为两者比值(数值模拟压力系数/实验压力系数)的最小值；曲线的终端处出现两者比值的最大值，说明屋盖背风面端沿受雪漂作用后压力较大。在 45°风向角下，2 个方向上的模拟曲线均先升后降；1.39 为 1 方向上两者数据比值最小值，2 方向上两者比值最小值约为 2.68；2 个方向上曲线的终端处均出现两者比值的最大值，表明屋面端沿处均出现屋盖的的平均压力系数最大值。当风向角为 90°时，实验数据有正有负，模拟数据均小于 0；在距曲线前端约十分之一处出现数值模拟平均压力系数的最大值。



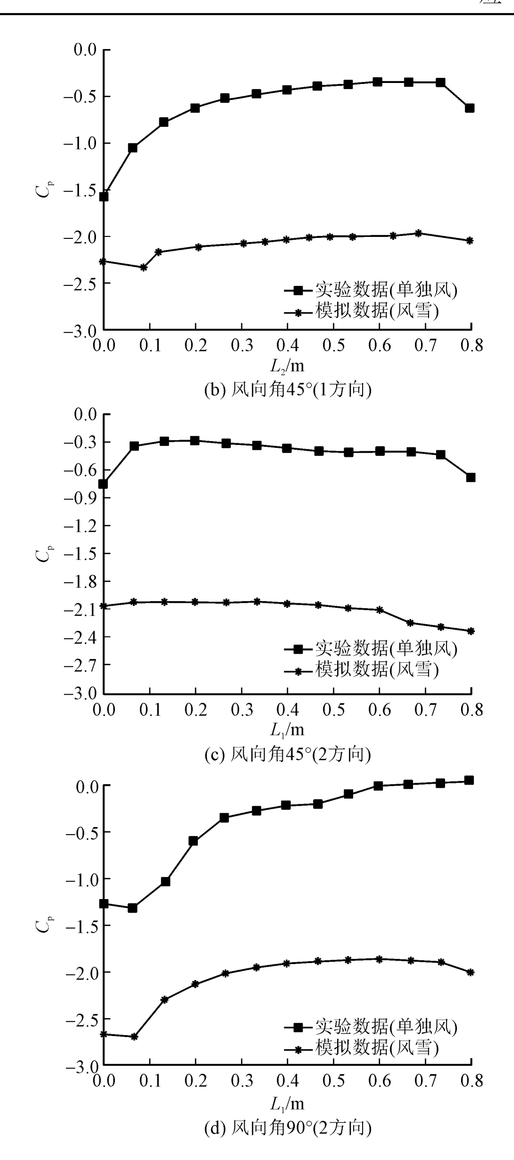


图6 正方形屋盖中轴线上测点的平均压力系数

Fig. 6 Average pressure coefficient of each measuring point on the central axis of square roof

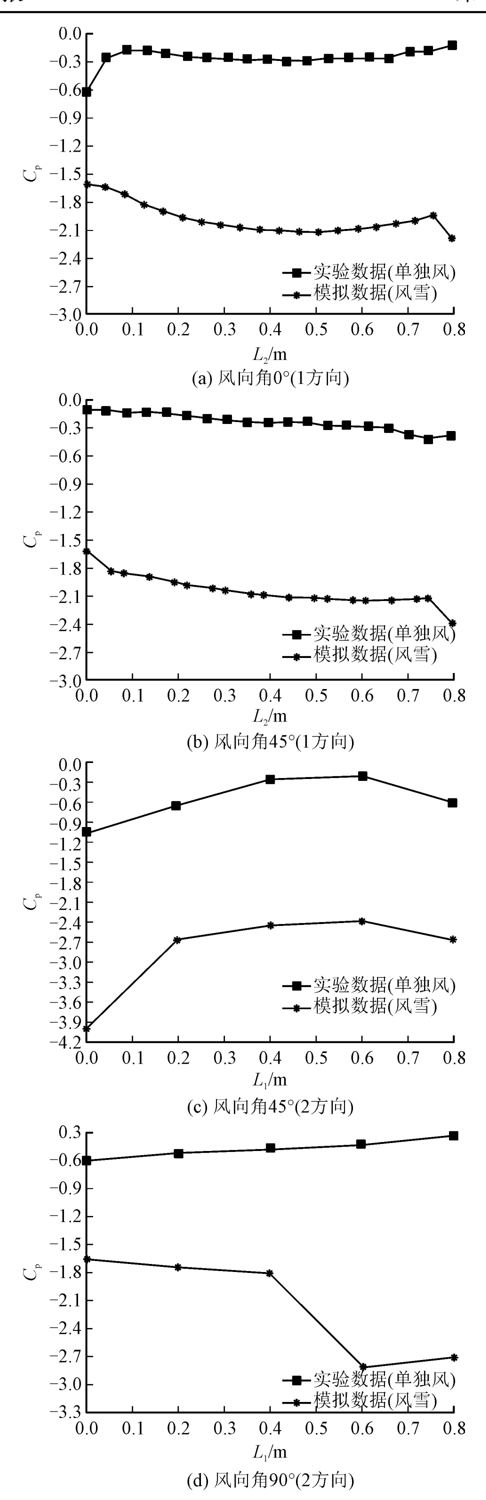


图7 矩形屋盖中轴线上测点的平均压力系数

Fig. 7 Average pressure coefficient of each measuring point on the central axis of rectangular roof

3.1.2 矩形大跨度双曲屋盖压力系数分析

由图7可知,在0°风向角1方向上数值模拟数据先减少后增加,说明屋盖的弧度变化对屋盖的压力情况有影响;3.3约为两者比值最小值,曲线终端出现两者比值的最大值。风向角为45°时,13.2、2.25分别为在1、2的2个方向上比值最小值;2个方向上均在屋面的端沿处均出现了风致积雪压力的最大值。当风向角为在90°时,模拟曲线先降后升,2.7约为两者数据比值的最小值;在距离结构迎风面约3/4处出现模拟平均压力系数最大值,此处的风致积雪压力最大。

3.1.3 圆形大跨度双曲屋盖压力系数分析

由图8可知,在0°风向角1方向上的模拟曲线先下降后上升;2.1约为两者数据比值的最小值;曲线中间出现两者比值的最大值,此时屋盖风致积雪压力的最大值出现在此处。

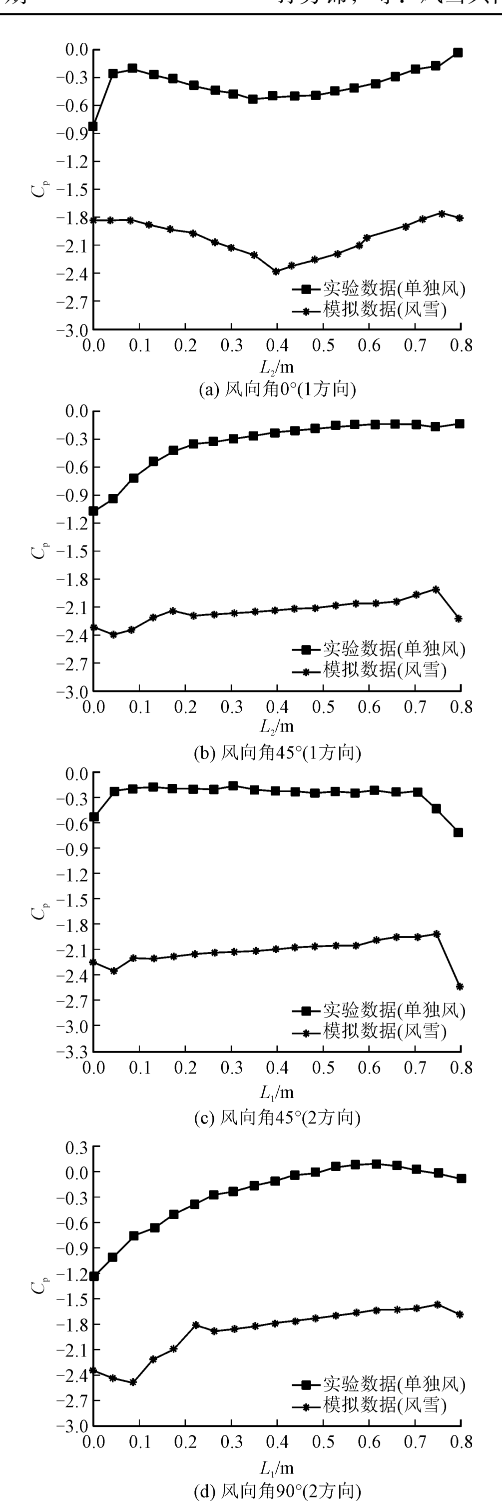


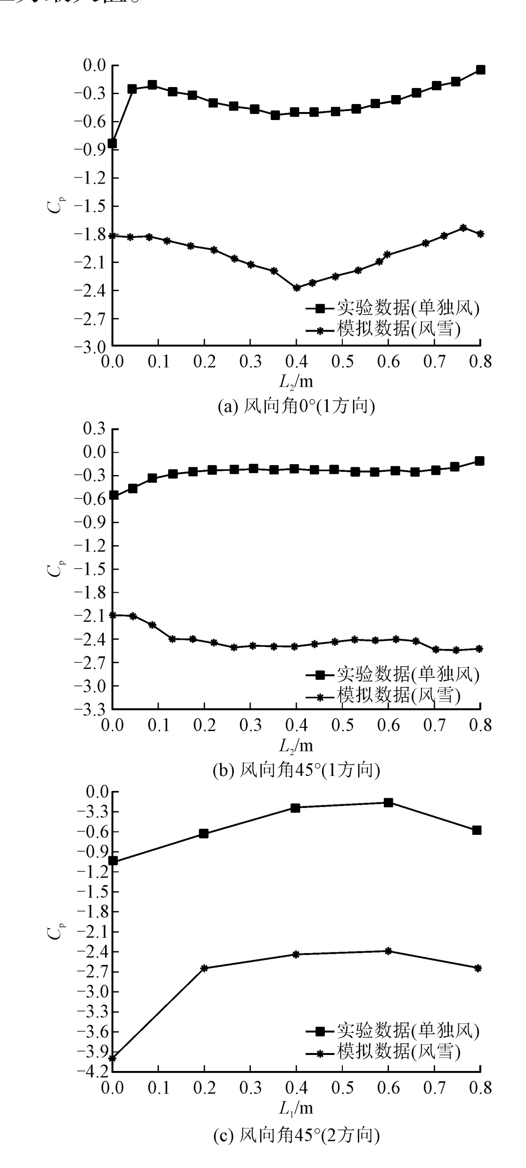
图 8　圆形屋盖中轴线上测点的平均压力系数

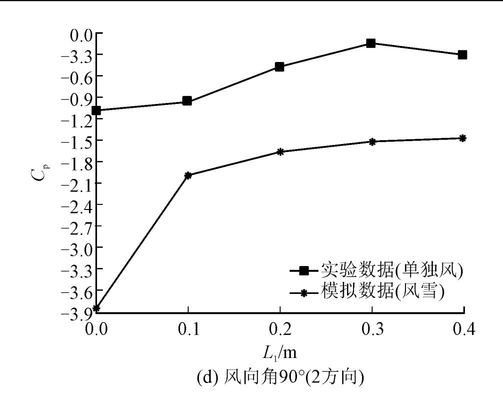
Fig. 8　Average pressure coefficient of each measuring point on the central axis of circular roof

当风向角为 45°时，在 1 方向上，模拟曲线上升下降反复出现，即屋盖弧度的变化也会对压力系数的变化产生；2.09 约为两者数据比值最小值，在曲线终端处出现两者比值的最大值；2 方向上，4.09 约为两者数据比值的最小值，在距曲线开端约 1/16 处出现比值最大值，这说明当风向角为 45°时，2 个方向上屋面的端沿处均出现风致积雪压力最大值。当风向角为 90°时，数值模拟数据均小于 0，实验数据有正有负。1.87 约为比值最小值，在距离结构迎风面约 1/8 处出现两者数据比值的最大值。

3.1.4　椭圆形大跨度双曲屋盖压力系数分析

由图 9 可知，在 0°风向角 1 方向上，实验压力系数有正有负，数值模拟数据均小于 0；实验曲线持续上升，模拟数据先减后增。3.1 约为两者数据比值的最小值；距迎风面大约 0.5 m 处出现两者比值的最大值。当风向角为 45°时，2 个方向上数值模拟曲线均先升后降，屋盖的平均压力随着屋盖弧度的变化先减少后增加；3.6、4 分别为 1、2 方向上两者数据的比值最小值；2 个方向上在屋面的端沿处均出现压力最大值。





(d) 风向角90°(2方向)

图9 椭圆形屋盖中轴线上测点的平均压力系数

Fig. 9 Average pressure coefficient of each measuring point on the central axis of elliptical roof

当方向角为90°时,数值模拟曲线总体呈上升趋势;2.1约为两者数据比值最小值,曲线开端处出现模拟平均压力的最大值,因此此时风致积雪压力最大值出现在距离屋盖迎风面端沿处。

3.2 对比4种双曲屋盖表面风致积雪压力系数

数值模拟不同风向角(0°、45°和90°)下4种不同形状的大跨度双曲屋盖表面的风致积雪压力系数。图10为4种模型在风致积雪压力作用下的中轴线压力系数对比图。

1)风向角为0°时,椭圆形、矩形和圆形屋盖中轴线上风致积雪压力系数走势基本一致,而正方形曲线走势与之相反;风致积雪压力系数大小顺序为矩形屋盖最大,然后是椭圆形、正方形和圆形屋盖。在迎风面端沿处正方形双曲屋盖压力最大,其他3种形状的压力最大值均在中间位置附近。

2)风向角为45°时,圆形和正方形屋盖中轴线上风致积雪压力系数曲线的趋势基本一样,圆形和矩形压力曲线走势基本相同。正方形双曲屋盖在2个方向上的压力都比较小,椭圆形双曲屋盖表面压力比较大,其他两个形状屋盖压力居中。

3)风向角为90°时,圆形、正方形和椭圆形屋盖表面数据曲线的趋势基本一致,而矩形的曲线走势与之相反。4种双曲屋盖表面平均压力大小排列顺序为矩形最大,然后是正方形、圆形、椭圆形屋盖。

4)由图10可知,矩形和正方形屋盖结构比圆形和椭圆形屋盖结构表面风致积雪压力大。

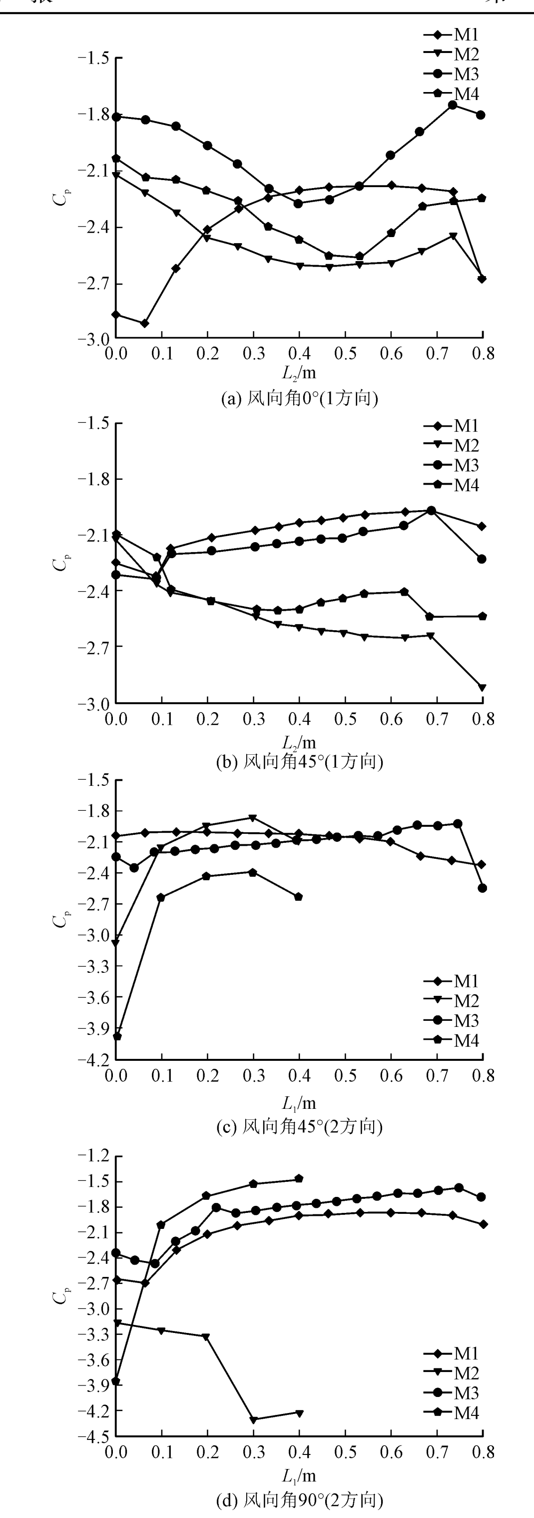


图10 不同形状的双曲屋盖中轴线上风致积雪压力系数

Fig. 10 Wind-induced snow pressure coefficient on the central axis of hyperbolic roof with different shapes

4 结 论

本研究利用FLUENT软件,模拟研究了4种大跨度双曲屋盖表面的积雪分布规律,并得到如下

结论。

1)在单独风下,4 种大跨度双曲屋盖结构表面平均压力系数比在风雪共同作用下屋盖表面的风致积雪压力系数小。风向角对大跨度双曲屋盖表面的风致积雪压力产生了很大影响,风向角不同时,不同形状屋盖表面压力大小排列顺序为,压力最大的是矩形屋盖,其次是椭圆形,然后为正方形、圆形。

2)当风向角不同时,这 4 种屋盖结构表面的风致积雪压力系数最大值出现的位置也不同:正方形和矩形的压力系数最大值均是在屋盖的端沿及距端沿较近处;圆形屋盖结构在 0°风向角下压力最大值出现在屋盖中间位置,在 45°、90°风向角下压力最大值均出现在屋盖端沿附近;椭圆形屋盖结构在 0°风向角下在距迎风面约 0. 5 m 处出现压力最大值,当风向角为 45°、90°时,在屋盖端沿附近均出现压力最大值。

3)当风向角为 45°时,矩形和正方形曲线走势基本相同,当风向角为 90°时,矩形、椭圆形和圆形双曲屋盖表面的压力系数曲线趋势基本一致;当风向角为 0°、45°时,矩形和椭圆形大跨度双曲屋盖表面风致积雪压力系数曲线趋势基本一样;但当风向角为 0°和 90°时,圆形和正方形屋盖的曲线走势相反,椭圆形和矩形屋盖表面的压力系数走势相反。

参考文献:

[1] 孙晓颖,洪财滨,武岳. 典型形式大跨度屋盖风雪漂移的数值模拟[J]. 振动与冲击,2014,33(18):36-42.
SUN Xiaoying, HONG Caibin, WU Yue. Numerical simulation of snow drifting on typical long-span roofs[J]. Journal of vibration and shock,2014,33(18):36-42(in Chinese).

[2] 刘博雅. 高低屋面积雪分布规律研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[3] BEYERS J H M,SUNDSBØ P A,HARMS T M. Numerical simulation of three-dimensional, transient snow drifting around a cube [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2004,92(9):725-747.

[4] TOMINAGA Y,OKAZE T,MOCHIDA A. CFD modeling of snowdrift around a building:An overview of models and evaluation of a new approach[J]. Building and environment,2011,46(4):899-910.

[5] BOUTANIOS Z, JASAK H. Two-way coupled Eulerian-Eulerian simulations of drifting snow with viscous treatment of the snow phase[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics,2017,169:67-76.

[6] ZHOU X Y, KANG L Y, GU M, et al. Numerical simulation and wind tunnel test for redistribution of snow on a flat roof[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2016, 153: 92-105.

[7] 邹琼,张嘉龙,王雅平. 多层建筑屋顶风场的数值模拟[J]. 应用力学学报,2021,38(1):208-215.
ZOU Qiong,ZHANG Jialong,WANG Yaping. Numerical simulation of wind field on the roof of multi-storey building[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(1):208-215(in Chinese).

[8] 王辉,胡贤柱,桑立娟. 体育场阶梯型悬挑屋盖风荷载数值模拟研究[J]. 应用力学学报,2019,36(5):1116-1122.
WANG Hui, HU Xianzhu, SANG Lijuan. Numerical simulation of wind-induced loads on ladder-type cantilevered roof of stadium [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019, 36(5):1116-1122(in Chinese).

[9] 孙芳锦,张大明,殷志祥. 大跨度膜屋面风致雪压的数值模拟研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2010,31(1):44-47.
SUN Fangjin,ZHANG Daming, YIN Zhixiang. Study on numerical simulation of wind -induced wind pressure on long-span membrane roofs[J]. Journal of Zhengzhou University(engineering science), 2010,31(1):44-47(in Chinese).

[10] 李跃,袁行飞. 大跨度球壳屋盖风致积雪数值模拟及雪荷载不均匀分布系数研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(10):130-136.
LI Yue,YUAN Xingfei. Numerical simulation of snow drifting and research on snow uneven distribution coefficient of long-span spherical shell roofs[J]. Journal of building structures,2014,35(10): 130-136(in Chinese).

[11] 赵雷,余志祥,齐欣,等. 低矮建筑屋盖风雪流作用场地实测与数值模拟[J]. 振动与冲击,2017,36(22):225-231.
ZHAO Lei,YU Zhixiang,QI Xin,et al. Field measurements and numerical simulation of snowdrift on low-rise buildings[J]. Journal of vibration and shock,2017,36(22):225-231(in Chinese).

[12] 颜卫亨,姬明辉,代鹏,等. 攒尖四坡屋面风致雪漂移的数值模拟[J]. 计算力学学报,2020,37(5):585-595.
YAN Weiheng,JI Minghui,DAI Peng,et al. Numerical simulation of snow drifting on pyramidal hipped roof[J]. Chinese journal of computational mechanics,2020,37(5):585-595(in Chinese).

[13] 姜昕彤,殷志祥,崔翰博. 开洞口煤仓风致积雪数值模拟及雪荷载不利分区研究[J]. 计算力学学报,2020,37(1):62-68.
JIANG Xintong,YIN Zhixiang,CUI Hanbo. Numerical simulation of snow drifting and research on snow unfavorable area of opening round coal bunker[J]. Chinese journal of computational mechanics,2020,37(1):62-68(in Chinese).

[14] 尹毅. 轻型折叠落地四坡屋面建筑表面风压特征研究[D]. 西安:长安大学,2015.

(编辑　史淑英)